

論文

貯雪用断熱被覆材としての籾殻の伝熱過程 第2報: 内部熱伝導および表面熱収支モデル構築の試み

上村 靖司¹⁾, 坂下 明子²⁾, 星野 真吾²⁾

要 旨

本論文では、第1報(上村ら, 2008)で得た露天保存実験と物性値測定の結果を踏まえて、籾殻層表面における熱収支と層内部の熱伝導について、伝熱過程の概略を理解するためのモデル構築を試みた。まず、表面からの入熱を知るために、表面熱収支を検討した。放射収支の実測結果から、晴天日中には概ね 800 W m^{-2} が日射として入り、うち約 200 W m^{-2} が直接反射し、同程度が赤外放射として大気に向かって放射されていた。日射吸収率は、午前から午後にかけて $0.65 \sim 0.85$ の範囲で大きくなり、平均 0.75 であった。また、放射収支の $90 \sim 92\%$ は顕熱または潜熱として大気へ放出され、残りの $8 \sim 10\%$ が籾殻層内へ流入していた。籾殻層内の温度分布とその時間変化を、一次元非定常熱伝導解析によって推定した結果、露天雪保存実験における実測値とよく一致した。熱伝導モデルから推定される籾殻層表面温度は、籾殻上方の長波放射計から求めた温度より 15°C ほど低く、層内部の熱伝導モデルで表現できない現象が表面付近で起きていると考察された。4月から9月の間の雪山高さの変化を計算した結果は実測値と良く一致し、モデルが妥当であると判断された。また雨の浸透により持ち込まれる熱は、外形の変化に寄与せず雪山への穴の形成に寄与することが示唆された。

キーワード: 雪山, 籾殻, 熱収支, 雪保存, 長期蓄熱

Key words: snow pile, rice husk, heat balance, snow storage, long-term thermal storage

1. はじめに

籾殻を断熱材として雪山を被覆すると1日に1~2 cmしか解けない。断熱材としての性能指標である熱伝導率で見ると、 $\lambda = 0.23 \sim 0.24 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ と、工業上広く使用されるグラスウールや発泡ウレタンなどに比べて10倍近く大きい。それにも関わらず雪保存のための断熱被覆材として優れている理由を解明するため、第1報では露天保存実験と物性値測定の結果を述べた(上村ら, 2008)。

本論文では、第1報で得た結果を踏まえて、籾殻層表面における熱収支と層内部の熱伝導について、露天実験の結果を用いて分析し、伝熱過程の概略を理解するためのモデル構築を試みる。

2. 籾殻層表面における熱収支

2.1 熱収支モデルと各要素

雪山の雪を消耗させる入熱について考えた場合、その熱源として支配的なのは日中の日射である。日射による籾殻被覆層の表面への入熱が層の表面温度を上げ、それによって大気への放射、対流(顕熱輸送 Q_{cv})、蒸散(潜熱輸送 Q_E)、籾殻層下方への熱伝導が起きる(図1)。式で表すと次のようになる。

$$Q_{rs} = Q_{ri} + Q_E + Q_{cv} + Q_{cd} \quad (1)$$

短波放射収支 Q_{rs} は、表面の反射率(アルベード) A_b と、全日射量 $Q_{rs\downarrow}$ [W m^{-2}] を用いて次式より求められる。

$$Q_{rs} = (1 - A_b) Q_{rs\downarrow} \quad (2)$$

1) 長岡技術科学大学機械系

〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1

2) 長岡技術科学大学大学院工学研究科

〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1

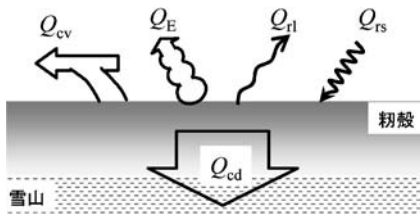


図 1 籾殻表面の熱収支モデル.

長波放射収支 Q_{rl} は、放射収支計により測定できるが、測定データが得られない場合には、例えば次の Brunt の実験式より求められる。

$$Q_{rl} = \sigma \left\{ (0.51 + 0.066\sqrt{e}) T_a^4 - T_s^4 \right\} (1 - nk) \quad (3)$$

σ はステファン・ボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), T_s , T_a はそれぞれ籾殻表面と大気温度 [K], e は水蒸気圧 [hPa], n は雲量, k は雲の種類によって決まる係数である。

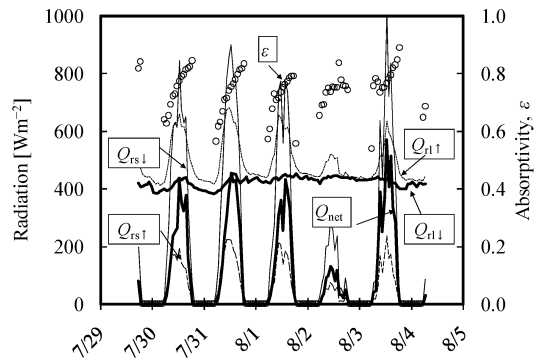
籾殻層内では、籾殻および内部に保持された空気の熱伝導、空気の移動による熱輸送、水分または蒸気の移動に伴う（潜熱輸送を含む）熱移動、放射が、同時に起きているが、厳密にこれらを取り扱うことは困難である。また、第 1 報で示したように、籾殻層を熱伝導体として取り扱った場合の熱伝導率 λ の値は含水率に依存して変化することにも注意が必要である。籾殻層内の熱通過の問題として考えれば、総括熱伝達率 α を用いて、表面から籾殻層内に流入する熱量 Q_{cd} は、次式で表される。

$$Q_{cd} = \alpha (T_s - T_1) \quad (4)$$

ここで T_1 は表面から d_1 の深さ位置での温度 [°C] である。表面から深さ d_1 までの籾殻層を熱伝導体として扱うことができるならば籾殻の熱伝導率 λ [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$] を用いて、 $\alpha = \lambda / d_1$ と表される。

2.2 放射収支の測定

2002 年 4 月～9 月にかけて新潟県魚沼市で行った露天雪保存実験において、7 月 30 日～8 月 4 日の 5 日間のみ、雪山頂部籾殻被覆上の 1.5 m の位置に長短波放射収支計（4 成分放射計、英弘精機 MR-50）を設置して放射収支を計測した。8 月 3 日が曇天、それ以外の日は晴天であった。

図 2 長波・短波放射と日射吸収率。
(2002 年 7 月 31 日～8 月 4 日)

短波放射量 Q_{rs} と長波放射量 Q_{rl} をそれぞれ上向き成分 (↑) と下向き (↓) に分けて図 2 に示す。下向き短波放射 $Q_{rs↓}$ は全天日射量，上向き短波放射 $Q_{rs↑}$ は被覆表面からの反射量である。また，下向き長波放射 $Q_{rl↓}$ は大気から被覆表面への赤外放射，上向き長波放射 $Q_{rl↑}$ は，被覆表面から大気への赤外放射を表す。

実質的に全放射量のうち被覆材に吸収される量を放射収支 Q_{net} と呼ぶこととし，短波放射収支 Q_{rs} ($= Q_{rs↓} - Q_{rs↑}$ ，被覆の吸収量)，長波放射収支 Q_{rl} ($= Q_{rl↑} - Q_{rl↓}$ ，赤外放射による大気への放熱) の差として次式で定義する。

$$Q_{net} = (Q_{rs↓} - Q_{rs↑}) - (Q_{rl↑} - Q_{rl↓}) \quad (5)$$

また下向き短波放射量 $Q_{rs↓}$ のうち，被覆表面に吸収される量の割合を日射吸収率 ε ($= 1 - A_b$) とし，次式で表す。

$$\varepsilon = (Q_{rs↓} - Q_{rs↑}) / Q_{rs↓} \quad (6)$$

図 2 の測定結果を見ると，晴天日のピーク時には概ね 800 W m^{-2} が日射として入り，そのうち約 200 W m^{-2} が直接反射し，同程度の量が長波放射収支として大気に向かい放射される。すなわち放射収支 Q_{net} は日射の約 50% であり，これが籾殻層の表面に吸収されることになる。日射吸収率 ε を見ると，午前から午後にかけて 0.65～0.85 の範囲で大きくなり，平均すると 0.75 となった。この日射吸収率の時間変化の理由は未解明である。その

後、実験室で模擬日射を籾殻表面に照射して観察した結果、籾殻の含水状態の変化によって光学特性が変化する様子が確認されたことから、今後詳細に検討して、別稿にて報告したいと考えている。

2.3 層内温度分布からの表面温度の推定

2002 年 4 月～9 月にかけて新潟県魚沼市で行った露天雪保存実験においては、実験敷地内で全天日射量を 10 分間に 1 回の間隔で測定するとともに、籾殻層内の温度分布を実測した。籾殻を 300mm 厚さで被覆した部分では、表面から 50mm, 150mm, 250mm 深さの位置に熱電対を挿入し、連続的に温度を測定した。2002 年 7 月 31 日を例として、測定結果を図 3 に示す。晴天日であるこの日の全天日射量は 13 時ごろピークとなり 800 W m^{-2} を超えた。そして、表面に最も近い 50mm 深さ位置の温度 (ch.1, T_1) は、13 時から 14 時にかけて約 40°C に達している。150mm 深さ位置 (ch.2, T_2)、250mm 深さ位置 (ch.3, T_3) の温度は、 T_1 に遅れて温度が緩やかに変化した。

これは時間経過に伴って温度プロファイルが変化する非定常熱伝導の問題であり、境界条件は 300 mm 厚さの籾殻層の底面が 0°C で保持 (雪山に接するため) されることである。しかしながら、温度変化が緩やかであることから次にしめす簡易な推定法を用いて、表面温度を推定することとした。全天日射量 $Q_{rs\downarrow}$ を基準として、 T_1 (表面から 50 mm 深さ)、 T_2 (表面から 150 mm 深さ) の時系列データとの相互相関を取ると、それぞれ 1.5 時間、4.5 時間だけ位相遅れのある周期的な温度変化を示す。そのことから、ある時刻 t における籾殻表面温度 T_s を、その時間から 1.5 時間後の T_1

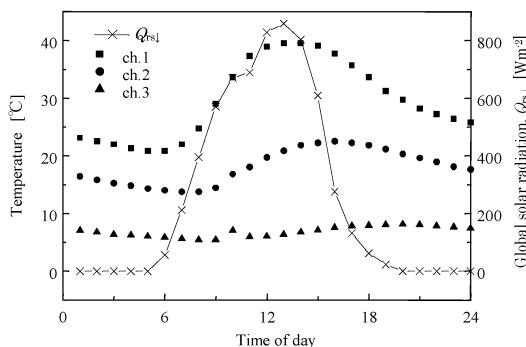


図 3 籾殻層内部温度と全天日射量。
(2002 年 7 月 31 日)

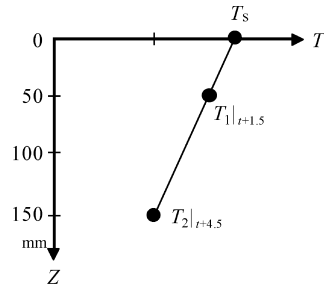


図 4 外挿による表面温度の推定。

と、4.5 時間後の T_2 によって外挿して推定することにした (図 4)。

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{1}{2} (3T_1|_{t+1.5} - T_2|_{t+4.5}) \\ &= \frac{1}{4} \left\{ 3(T_1|_{t+1} + T_1|_{t+2}) - (T_2|_{t+4} + T_2|_{t+5}) \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

これより、内部温度の実測値から T_s が求められ、これを (4) 式に代入することより Q_{cd} が計算される。

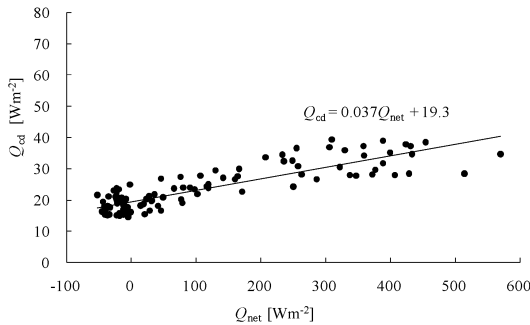
2.4 顕熱・潜熱の推定

雪山周囲の風速場と表面温度 T_s が得られれば、顕熱輸送量 Q_{cv} は推定できるし、籾殻層内湿度を飽和と仮定すれば、潜熱輸送量 Q_E も推定は可能である。しかし、今回の実験においてはこれらの全てのパラメータが未計測であるため、本論文では大気への直接熱放出であるこの両項をまとめて推定することとする。

まず、(1) 式を以下のように変形する。

$$\begin{aligned} (Q_E + Q_{cv}) &= (Q_{rs} - Q_{rl}) - Q_{cd} \\ Q_d &= Q_{net} - Q_{cd} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 Q_d は、 $Q_d = Q_{cv} + Q_E$ である。この変形より、大気への放熱量 Q_d は、籾殻表面への放射による入熱量 Q_{net} と籾殻層内へ流れる熱量 Q_{cd} の差で表され、この両者は、2.2 と 2.3 で述べたとおり求められる。まず、(7) 式と (4) 式に実測の籾殻層内の温度を入力して Q_{cd} を求めた結果を、実測の Q_{net} を横軸として図 5 に示す。図からわかるように、 Q_{net} が $-52 \sim 570 \text{ W m}^{-2}$ という範囲で変動するのに対して、 Q_{cd} は $14 \sim 39 \text{ W m}^{-2}$ という小さな

図 5 Q_{cd} と Q_{net} の関係 (稲殻被覆厚さ 30 cm).

値を取る. 全体としては Q_{net} に比例して増加し, 直線で近似すると, 以下の式で表される.

$$Q_{cd} = 0.036Q_{net} + 19.3 \quad (9)$$

さらにこれを (8) 式に代入すると Q_d は

$$Q_d = 0.963Q_{net} - 19.3 \quad (10)$$

となる. すなわちこの式から, 夏季日中の Q_{net} が $300 \sim 400 \text{ W m}^{-2}$ であるとき, その熱量の 90~92% は, 顕熱または潜熱として大気へ放出され, 残りの 8~10% が稲殻層内へ流入するということがわかる.

3. 稲殻層内の熱伝導シミュレーション

稲殻層の表面熱収支の検討結果を用いて, 得られた稲殻表面温度 T_s の妥当性を検討するため, 稲殻層内の一次元非定常熱伝導解析を行った.

稲殻層厚さは 30 cm とし, 図 6 に示すような解析モデルを作り, 内部温度の時間変化を計算した. 解析モデルに示すように, 稲殻表面から雪山表面までを計算範囲とし, 10 mm メッシュで分割した.

解析に用いた差分方程式を以下に示す.

$$T_i^{t+\Delta t} = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t) + T_i^t \quad (11)$$

初期温度は, 露天雪保存実験での実測データ ch.1, ch.2, ch.3 を用い, それらの間は線形補間をして与えた. 境界条件として, T_0 を稲殻表面温度 T_s とし, T_{30} は雪山表面温度を 0°C 一定として与

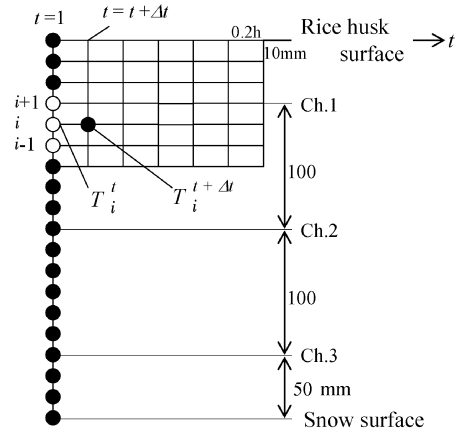


図 6 稲殻層一次元非定常熱伝導解析モデル.

表 1 稲殻物性値.

熱伝導率	$\lambda [\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}]$	0.235
密度	$\rho [\text{kg m}^{-3}]$	104
含水率	$\gamma [\%]$	2.7
比熱	$C [\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$	2.79
熱拡散率	$\alpha [\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$	9.06×10^{-8}

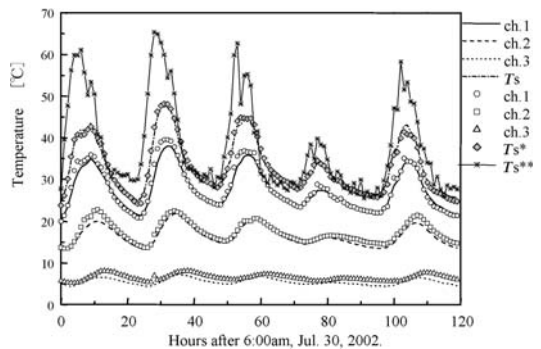


図 7 稲殻の内部・表面温度.

えた. なお, 計算途中の T_s は内部温度の外挿から求めるのではなく, (9) 式で Q_{cd} を求めて (4) 式に代入し, そこから求めた温度を T_s^* として与えた. タイムステップ Δt は 0.2 h とした. 解析に用いた物性値は表 1 に示す通りである.

7 月 30 日から 8 月 4 日までの稲殻の内部温度変化の計算結果を図 7 に示す. プロットが実測値, 曲線が計算値である. 図に示すように, 各温度測定位置での計算結果は, 実測値とよい一致を

示している。実測の温度分布から外挿によって初穀層表面温度 T_s を推定し、 T_s から伝導熱量 Q_{cd} を求め、 Q_{cd} と Q_{net} の関係を整理し、その関係式から T_s^* を求めているわけだから、良く一致するのは当然のことである。しかし、ここで重要なのは、第 1 報で得た、総括熱伝導率を、一次元非定常熱伝導モデルに与えて、層内の温度分布が正確に再現されたことである。すなわち、初穀の熱伝導率が一般の断熱材よりもはるかに大きいという事実には間違いなく、内部の熱伝導を抑制する効果以外の効果によって、初穀の断熱材としての優位性が発揮されていることを示唆している。

図 7 に、放射収支計の上向き長波放射量から求めた表面温度 T_s^{**} もプロットした。これを見ると、層内部温度から外挿によって推定された表面温度 T_s が晴天日の日中で 45°C 前後であるのに対して、 T_s^{**} は、 60°C 前後と、 15°C ほど大きい。深さ 50 mm 位置 (ch.1) の値は実測値であり妥当と判断されるから、これよりも上部の表面に近い層内で、温度プロファイルの直線関係が破綻する部分があると推定される。すなわち、表面近傍で、一旦吸収した日射を顕熱または潜熱で放出する機能を有するのだろうと推測できる。

整理すると、日射 $Q_{rs\downarrow}$ を 100% としたとき、そのうち約 25% が短波長として反射され、約 25% が長波放射収支として天空に向かって放射され、残り 50% (Q_{net}) のうち 45% 以上が潜熱・顕熱輸送で大気に放出され、初穀層内部に伝わり雪山の融解に寄与するのは 5% 以下となる。このことはこれまでの実験結果とも整合し、妥当であると判断できることから、表面付近の放熱機能の解明が、初穀による断熱機構の理解のための本質であると結論づけられる。

4. 雪山の日融解量

目的の時期に、所定量の雪を使うためには、初期にどれだけの雪を保存しておけばいいかを把握しておく必要がある。雪山が外部からの入熱によって消耗する量を推定するために、以下の仮定をおく。

- (1) 水平方向に無限な一定厚さで、一様 (密度一定) な雪山とする
- (2) 雪山下方からの入熱は無視する

- (3) 雪山上方からの入熱は雪山上部表面の雪の融解に使われる

- (4) 雪山への入熱は全て雪の融解に使われる

(2) については、河島ら (2002) の地温観測結果を参考に、融雪水が地中浸透するようになっている場合には土中温度が低下し、熱流入が無視する程度になると仮定したものである。

以上の仮定にもとづき、 1 m^2 断面の四角柱を計算対象として考えたとき、雪山が一日に融ける高さ $\Delta h [\text{m s}^{-1}]$ は次式で表される。

$$\Delta h = \frac{Q_{cd} - Q_{rain}}{\rho L} \quad (12)$$

ここで、 $Q_{cd} [\text{W m}^{-2}]$ は初穀層内へ流入する熱量、 ρ は雪の密度 ($=500\text{ kg m}^{-3}$ とする)、 L は水の融解潜熱 ($=334\text{ kJ kg}^{-1}$) である。初穀被覆の場合、降雨の浸透を許容するため、降雨によってもたらされる熱量 Q_{rain} も考慮する必要があり、次式で表される。

$$Q_{rain} = C_p \rho_w V \beta (T_r - T_s) \quad (13)$$

ここで、 C_p は水の比熱 ($=4.186\text{ kJ kg}^{-1}\text{ K}^{-1}$)、 ρ_w は水の密度 ($=1000\text{ kg m}^{-3}$)、 V は降水量 $[\text{m}]$ 、 T_r は降水の温度であるが、ここでは大気温度 T_a と等しいものとする。 β は初穀層の雨の浸透率であり、ここでは 1 とする。

露天雪保存実験の 4 月 24 日から 8 月 30 日の間の雪山頂部の高さを、以上のモデルにより計算する。全天日射量は現地での実測値を用いる。長波放射量は 7 月 31 日から 8 月 4 日にかけての放射収支データしかないため、(3) 式の Brunt の実験式を用いて推定する。大気温度 T_a は、AMeDAS 小出観測地点のデータを用い、水蒸気圧 e 、雲量 n は、新潟地方気象台のデータを用いる。雲の種類によって決まる係数 k は、高層雲、中層雲、低層雲に対しそれぞれ 0.21, 0.77, 0.86 と知られている。雨を降らせる雲は低層雲であるので、降水量のある時間を $k=0.86$ とし、それ以外の曇り・晴れの時間は 0.21 と 0.77 の平均を取って、 $k=0.49$ とする。初穀表面温度は (4) 式で推定する。

以上を (12) 式に代入し、融解にともなう雪山高

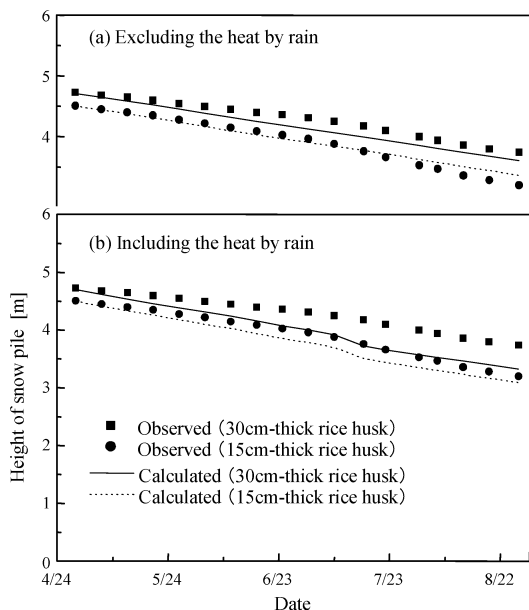


図 8 雪山の融解シミュレーション.

さの変化を計算し、露天雪保存実験の実測値との比較を行った。結果を図 8 に示す。籾殻被覆の場合には雨は浸透するが、図に示すように雨が持ち込む熱量を考慮しない場合に、実験値と計算値はよい一致を示す。雨が持ち込む熱量を考慮した場合、計算結果の方が雪山高さの減少が早い。

第 1 報で述べているように、籾殻被覆上に降った雨は、水みちを形成しながら、雪山に向かい、穴を形成する。そのため雨が持ち込む熱量は穴の形成に使われ、雪山高さの変化には寄与しない。したがって、残雪の総量としては、雨の持ち込む熱量を加えた計算結果の方が妥当だと考えられる。

5. まとめ

本研究の目的は、貯雪用被覆材としての籾殻の表面および層内の伝熱過程の検討によってその断熱材としての優位性の理由を解明することである。

まず、雪山の雪を消耗させる入熱を知るために、表面熱収支を検討した。放射収支の実測結果から、晴天日中には概ね 800 W m^{-2} が日射として入り、そのうち約 200 W m^{-2} が直接反射し、同程度の量が赤外放射として大気に向かって放射されていた。日射吸収率は、午前から午後にかけて $0.65 \sim 0.85$ の範囲で大きくなり、平均すると 0.75

であった。放射収支と雪山への入熱量の関係を整理した結果、放射収支の $90 \sim 92\%$ は、顕熱または潜熱として大気へ放出され、残りの $8 \sim 10\%$ が籾殻層内へ流入することがわかった。

籾殻層の温度分布を、一次元非定常熱伝導解析で推定した結果、各温度測定位置での計算結果は露天雪保存実験における実測値とよく一致した。

籾殻上方で測定した長波放射量から求めた籾殻層表面温度は、熱伝導モデルから推定される籾殻層表面温度よりも 15°C ほど高く、内部熱伝導モデルで表現できない現象が、表面付近の層内で起きていると推定された。

表面熱収支モデルから、雪山高さの変化を再現するシミュレーションを行った結果、実測値と良く一致した。そして雨の浸透により持ち込まれる熱は、雪山外形の変化に寄与せず、雪山の穴の形成に寄与することが示唆された。

以上から、籾殻の断熱材としての優位性の理由としてわかったことと、明らかになった課題を列記する。

- (1) 籾殻層の内部は、その撥水性によって大量の降雨があっても、大部分が乾燥状態を保つ。
- (2) 層内部の伝熱は、単純な熱伝導として理解して差し支えない。
- (3) 層の総括熱伝導率は $0.23 \sim 0.24 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ であり、断熱材としての優位性は高くない。
- (4) 籾殻層表面温度を抑制する効果が、籾殻の優位性の本質であると推察され、表面付近の顕熱・潜熱輸送の機構解明が課題である。
- (5) 関連して、表面の日射吸収率の午前から午後にかけての変化の理由解明も課題である。

謝 辞

本研究は、J-POWER 電源開発株式会社との共同で行われたことを記し、関係された各位に謝意を表します。

文 献

- 上村靖司・庄山武志・星野真吾, 2008: 貯雪用断熱被覆材としての籾殻の伝熱過程 第 1 報: 露天雪保存実験および物性測定, 雪氷, **70**, 15-22.
- 河島克久・飯倉茂弘・杉山友康・遠藤 徹・藤井俊茂, 2002: 鉄道防災に適用可能な日融雪量の簡易推定方法, 雪氷, **64**, 605-615.

**Heat transfer process on rice husk layer as an insulation
material for long-term snow storage
Part 2 : heat balance on the surface and simulation
of heat conduction inside the rice husk layer**

Seiji KAMIMURA¹⁾, Akiko SAKASHITA²⁾ and Shingo HOSHINO²⁾

*1) Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology,
1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata 940-2188*

*2) Graduate school of Engineering, Nagaoka University of Technology,
1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata 940-2188*

Abstract: The aim of this research is to investigate the advantages of rice husk as an insulation material for long-term snow storage. This paper describes the heat balance model of the rice husk surface and the heat conduction analysis of the rice husk layer based on the open-air snow pile storage experiment and measurements of the properties in the first report (Kamimura *et al.*, 2007). Measurement of the net radiation shows the following results : approximately 25% of the maximum solar radiation of 800 W m^{-2} on a sunny day is reflected directly from the surface into the air, and the same amount of energy is emitted as long-wave radiation into the air. The average surface albedo of rice husk is 0.75 and increases with time, ranging from 0.65 to 0.85. The energy of 90-92% of the net radiation is absorbed at the surface, released into the air by sensible and/or latent heat transfer, and the remaining 8-10% flows into the snow pile through the rice husk layer. The temperature profile of the rice husk layer was simulated by using one-dimensional, non-steady heat conduction analysis, and it was found to agree well with the temperature profile observed outside the experiment. Since the surface temperature estimated by the calculation of heat conduction is 15°C below that recorded by a radiation meter, it is considered that another heat transfer phenomenon, which cannot account for the heat conduction model, occurs at the neighboring surface layer. Long-term simulations of the decrease in the height of the snow pile agree well with the observation results. Further, it is shown that the heat transferred by rain may not contribute toward the deformation of the snow pile but toward the creation of holes.

(2007 年 6 月 8 日受付, 2007 年 12 月 25 日改訂受付, 2008 年 1 月 29 日最終改稿受付, 2009 年 1 月 29 日受理
討論期限 2008 年 9 月 15 日)